

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

G01N 23/203

G01T 1/18



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03100190.4

[43] 公开日 2003 年 7 月 23 日

[11] 公开号 CN 1431488A

[22] 申请日 2003.1.8 [21] 申请号 03100190.4

[30] 优先权

[32] 2002. 1. 10 [33] US [31] 10/044, 202

[71] 申请人 特罗克斯乐电子实验室有限公司

地址 美国北卡罗莱纳州

[72] 发明人 罗伯特·E·特罗克斯乐

W·莱纳斯·德普

[74] 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司

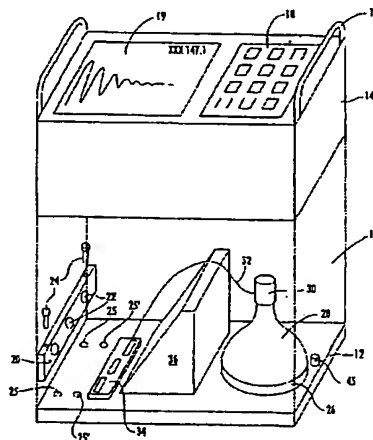
代理人 李 辉

权利要求书 5 页 说明书 12 页 附图 3 页

[54] 发明名称 低放射性核子密度测量仪

[57] 摘要

本发明提供一种核子测量仪和测试方法，用于测量位于材料表面之下较薄区层内的材料密度。该测量仪包括测量仪外壳和大致平坦的底板。在测量仪外壳内，安装具有特性原始能量、放射性不超过 100 微居的  $\gamma$  射线源，并与底板配合使所发射的  $\gamma$  射线通过底板进入下面的材料样品。在横向与  $\gamma$  射线源隔开，安装可用于量化所检测的  $\gamma$  射线的能级的能量可选  $\gamma$  射线检测器。在射线源与检测器之间设置屏蔽体，用于防止  $\gamma$  射线直接从射线源到达检测器。分析器与用于检测预定能谱内的  $\gamma$  射线计数的检测器相连，该预定能谱具有 0.1MeV 或者更高的下限和低于所述射线源的特性原始能量的上限。根据该分析器获得的位于预定能谱内的  $\gamma$  射线计数，计算样品密度。



ISSN 1008-4274

1. 一种用于测量材料密度的核子测量仪, 所述测量仪包括:  
测量仪外壳, 具有适于放置在材料样品表面上的表面;
- 5 至少一个 $\gamma$ 射线源, 位于所述测量仪外壳内, 具有特性原始能量和不超过100微居的总放射性, 所述至少一个射线源被设置为用于通过所述外壳表面放射 $\gamma$ 射线并使该射线进入下面的材料样品;  
至少一个能量可选 $\gamma$ 射线检测器, 与所述至少一个 $\gamma$ 射线源隔开, 安装在测量仪外壳内, 所述 $\gamma$ 射线检测器可用于产生表示所检测的 $\gamma$ 射线的能  
10 级的信号; 以及  
密度计算装置, 与所述检测器相连, 可用于根据所述至少一个检测器检测的其能级在 $\gamma$ 射线的预定能谱部分内的检测信号, 计算材料样品的密度值。
2. 根据权利要求1所述的测量仪, 其中所述密度计算装置包括分  
15 析器, 该分析器与所述至少一个检测器相连, 可用于从检测器接收所述信号, 所述分析器包括对与所述预定能谱部分对应的一个或多个通道内的各信号进行分类和累计的装置。
3. 根据权利要求2所述的测量仪, 其中所述分析器是多通道分析器, 该多通道分析器对所述至少一个检测器检测的 $\gamma$ 射线能谱范围内的多  
20 个离散通道内的各信号进行分类和累计, 并且其中至少一个所述离散通道确定所述预定能谱部分。
4. 根据权利要求1所述的测量仪, 其中 $\gamma$ 射线的所述预定能谱部分具有0.1MeV的下限和不超过所述射线源的特性原始能量的上限。
5. 根据权利要求4所述的测量仪, 其中所述至少一个射线源包括  
25 至少一个原始能量为0.662 MeV的铯-137 $\gamma$ 射线源。
6. 根据权利要求5所述的测量仪, 其中所述预定能谱在0.1 MeV至0.4 MeV范围内。
7. 根据权利要求5所述的测量仪, 其中所述预定能谱在0.1 MeV至0.25 MeV范围内。

8. 根据权利要求1所述的测量仪,其中所述至少一个 $\gamma$ 射线源包括多个点射线源,每个点射线源之间互相隔开并与所述检测器隔开,并且这些点射线源排列在与所述底板大致平行的共同平面内。

9. 根据权利要求1所述的测量仪,该测量仪包括具有特性原始能量并且其放射性不超过50微居的附加 $\gamma$ 射线源,将所述附加射线源安装在所述测量仪外壳内,并且其所在位置便于 $\gamma$ 射线直接从所述附加射线源到达所述检测器。

10. 根据权利要求1所述的测量仪,其中该测量仪还包括背景射线检测装置,可用于计算表示周围背景 $\gamma$ 射线的值,并且所述密度计算装置与背景射线检测装置共同用于计算针对周围背景射线进行了校正的材料样品的密度值。

11. 根据权利要求10所述的测量仪,其中所述背景射线检测装置包括使所述至少一个射线源设置在对所述检测器屏蔽的位置的装置,以便检测器可以检测到非所述射线源发出的 $\gamma$ 射线。

12. 根据权利要求2所述的测量仪,该测量仪还包括与所述分析器相连、用于针对所述检测器的温度敏感性进行校正的稳定装置,所述稳定装置包括对所述分析器的至少一个其它选择通道内的基准信号作出响应的装置,所述至少一个其它选择通道表示位于所述预定能谱部分之外的能级。

13. 根据权利要求12所述的测量仪,其中所述稳定装置包括特性原始能量不同于所述至少一个射线源的特性原始能量的附加 $\gamma$ 射线源,并且所述至少一个其它选择通道对应于所述附加射线源的特性原始能量。

14. 根据权利要求1所述的测量仪,该测量仪包括:屏蔽室,位于所述外壳内;以及圆盘,可旋转地安装在屏蔽室内,并且所述 $\gamma$ 射线源安装在所述圆盘上,可以旋转此圆盘以将该射线源从屏蔽室内的缩进屏蔽位置移动到暴露位置进行测量。

15. 根据权利要求1所述的测量仪,其中所述密度计算装置包括在预定计数时间中重复计算密度值的装置,而且该装置包括与所述密度计

算装置配合的显示装置，用于在所述预定计数时间中显示作为时间的函数的计算密度值。

16. 一种用于测量材料密度的核子测量仪，所述测量仪包括：  
测量仪外壳；

5 底板，位于所述测量仪外壳上，适于放置在材料样品表面上；

至少一个 $\gamma$ 射线源，位于所述测量仪外壳内，具有特性原始能量和不超过100微居的总放射性，所述至少一个射线源被设置为用于通过所述底板放射 $\gamma$ 射线并使该射线进入下面的材料样品；

至少一个能量可选 $\gamma$ 射线检测器，与所述至少一个 $\gamma$ 射线源隔开，安  
10 装在测量仪外壳内，所述 $\gamma$ 射线检测器可用于产生表示所检测的 $\gamma$ 射线的能级的信号；

屏蔽体，在所述测量仪外壳内，位于所述至少一个射线源与所述检测器之间用于阻挡 $\gamma$ 射线从所述射线源直接进入所述检测器；

分析器，与所述检测器可操作地相连，用于从检测器接收所述信号，  
15 所述分析器包括对所检测 $\gamma$ 射线能谱范围内的一个或多个通道内的各信号进行分类和累计的装置；

背景射线检测装置，与所述分析器相连，可用于计算表示周围背景 $\gamma$ 射线的值；

密度计算装置，与所述检测器相连，可用于根据被选择表示所述至  
20 少一个检测器检测的 $\gamma$ 射线的预定能谱部分的一个或多个所述通道内的累计信号，计算材料样品的密度值，并且所述密度计算装置还与所述背景射线检测装置配合用于计算针对周围背景射线进行了校正的材料样品的密度值；以及

稳定装置，与所述分析器相连，用于针对所述检测器的温度敏感性  
25 进行校正，所述稳定装置包括对所述分析器的至少一个其它选择通道内的基准信号作出响应的装置，所述至少一个其它选择通道表示位于所述预定能谱部分之外的能级。

17. 根据权利要求16所述的测量仪，其中所述稳定装置包括具有不同于所述至少一个射线源的特性原始能量的特性原始能量并且其放射性

不超过50微居的附加 $\gamma$ 射线源, 所述附加射线源安装在所述测量仪外壳内, 并且其所在位置便于 $\gamma$ 射线直接从所述附加射线源到达所述检测器, 从而产生所述基准信号, 并且响应基准信号的所述装置响应所述附加 $\gamma$ 射线源的特性能级。

- 5        18. 根据权利要求16所述的测量仪, 其中所述稳定装置包括在所述屏蔽体中形成的通道, 用于对 $\gamma$ 射线提供从所述至少一个 $\gamma$ 射线源直接到达所述检测器从而产生所述基准信号的通路, 并且所述响应基准信号的装置响应所述至少一个 $\gamma$ 射线源的特性能级。

- 10       19. 根据权利要求16所述的测量仪, 其中该测量仪包括: 屏蔽室, 位于所述外壳内; 可移动射线源支架, 位于屏蔽室内, 该射线源支架可以使射线源从屏蔽室内用于进行背景射线测量的缩进屏蔽位置移动到用于对材料进行密度测量的暴露的非屏蔽位置。

- 15       20. 根据权利要求16所述的测量仪, 该测量仪包括安装板, 所述至少一个射线源位于该安装板上, 该安装板可拆卸地连接到所述底板上的预定位置从而允许从测量仪外壳上卸下射线源, 并且该测量仪还包括系链, 用于将射线源板连接到所述底板, 从而在将反射源板从所述底板卸下时不致丢失或分离。

- 20       21. 根据权利要求16所述的测量仪, 该测量仪包括: 屏蔽室, 位于所述外壳内; 以及可移动射线源支架, 位于屏蔽室内, 该射线源支架可以使射线源从屏蔽室内的缩进屏蔽位置移动到用于进行测量的暴露的非屏蔽位置。

22. 一种用于测量材料密度的方法, 该方法包括:

从具有特性原始能量和总放射性不超过100微居的至少一个射线源将 $\gamma$ 射线放射到材料内;

- 25       检测已经与材料互相作用并被材料后向散射的 $\gamma$ 射线, 并且对检测 $\gamma$ 射线的能级进行量化;

选择其能级在检测的 $\gamma$ 射线的预定能谱部分内的 $\gamma$ 射线计数; 以及根据位于所述预定能谱部分内的选择 $\gamma$ 射线计数, 计算样品密度值。

23. 根据权利要求22所述的方法, 其中所述检测 $\gamma$ 射线的步骤包括产生表示所检测 $\gamma$ 射线能级的信号; 并且所述选择 $\gamma$ 射线计数的步骤包括: 对位于所检测 $\gamma$ 射线能谱范围内的、分析器的一个或多个通道内的各信号进行分类和累计; 以及选择仅表示 $\gamma$ 射线的预定能谱部分的一个或多个通道。

24. 根据权利要求23所述的方法, 其中所述选择一个或多个通道的步骤包括选择表示其能量具有0.1MeV的下限和不超过所述射线源的特性原始能量的上限的 $\gamma$ 射线的通道。

25. 根据权利要求24所述的方法, 其中射线源是原始能量为0.662 MeV的铯-137, 并且所述选择步骤包括选择表示其能量在0.1 MeV至0.4 MeV范围内的 $\gamma$ 射线的通道。

26. 根据权利要求23所述的方法, 该方法还包括检测背景射线并考虑周围背景射线来校正材料样品的密度值。

27. 一种用于测量材料密度的方法, 该方法包括:  
从具有特性原始能量和总放射性不超过100微居的至少一个射线源将 $\gamma$ 射线放射到材料内;

检测已经与材料互相作用并被材料后向散射的 $\gamma$ 射线, 并且产生表示所检测 $\gamma$ 射线的能级的信号;

根据信号的能级对信号进行分类并在分析器的相应通道内累计信号计数;

在表示所检测 $\gamma$ 射线的预定能谱部分的、分析器的一个或多个选择通道内选择累计信号; 以及

根据选择的累计信号计算样品密度值; 以及  
显示所计算的材料密度值。

28. 根据权利要求27所述的方法, 其中在预定时间周期内执行所述分类和累计信号的步骤, 并且在所述预定时间周期内重复进行所述计算步骤和所述显示步骤。

29. 根据权利要求27所述的方法, 其中所述计算步骤包括对各信号进行数字滤波以降低所计算密度值中的统计误差的步骤。

## 低放射性核子密度测量仪

## 5 技术领域

本发明涉及密度的测量，更具体地说，本发明涉及利用 $\gamma$ 射线测量样品密度的测试仪器和测试方法。本发明尤其适于测量位于样品表面之下的较薄区层的密度。

## 10 背景技术

在沥青路面铺路业，经常利用便携式核子测量仪 (nuclear gauge) 测量沥青路面的密度。通常，在准备好的路床基础上或现有铺砌路面上，将沥青铺路材料铺设为较薄层，例如厚度在约1至2英寸的数量级。因此，需要测量路表面之下较薄区层，例如1至3英寸深度的路面样品的密度。

15 为此，已经开发出用于直接测量薄层铺路材料的密度的核子测量仪。例如，在共同拥有的第4,641,030号、第4,701,868号和第6,310,936号美国专利中对这种类型的核子“薄层”测量仪进行了描述。这些专利描述的“薄层”测量仪采用含有约8毫居的铯-137 (Cesium-137) 的铯-137 (137Cs)  $\gamma$ 射线源。利用盖革-弥勒 (Geiger-muller) 管检测作为下面的样品散射的康普顿射线的 $\gamma$ 射线，设置盖革-弥勒管以形成两个几何结构相异的射线源-检测器关系，并根据相应检测器检测的 $\gamma$ 射线计数，计算材料的密度。

20 尽管这些测量仪内的 $\gamma$ 射线源的放射性非常低，在毫居范围内，而且具有普通防护和保护措施的操作员可以安全使用它，但是管理机关仍对维护、运输、储存和使用这种测量仪以及对操作这种测量仪的合格人员做出限制。因此，需要一种不受管理机关对现有测量仪的要求的限制、采用非常低放射性射线源的测量仪。

### 发明内容

因此,本发明的一个目的是提供一种采用低放射性射线源,适于测量样品表面之下较薄区层的密度的核子测量仪。

本发明的更具体的目的是提供一种可以利用放射性为微居量级的 $\gamma$ 射线源工作的测量仪,更具体地说, $\gamma$ 射线源的放射性不超过100微居,更希望其放射性不超过50微居。采用这些低放射性核源的测量仪不受限制和约束,或者所受限制和约束较少。

以前利用低放射性(微居)射线源生产核子测量仪的尝试取得了有限的成功,这主要是因为它们的精度有限。作为例子,共同拥有的第4,766,319号美国专利对采用低放射性核源的一种现有核子测量仪做了描述。基于低放射性 $\gamma$ 射线源开发测量仪的主要困难在于, $\gamma$ 射线检测中的信噪比低,这是因为低放射性核源产生较低的 $\gamma$ 射线通量。如果不牺牲测量精度,待测试材料内存在的某种自然产生放射性的元素(例如:K-40, U和Th)射出的背景射线就产生不可忽视的噪声。对于采用高放射性 $\gamma$ 射线源的传统测量仪(例如:8000微居Cs-137核源)来说,信噪比高,并且背景射线不会导致显著误差。

本发明提供了一种适于测量位于铺路材料样品表面之下较薄区层的密度的核子测量仪和方法。该测量仪用于测量位于材料样品表面之下至多某个具体深度,例如至多1英寸或至多3英寸的区层内的密度。该测量仪采用总放射性不超过100微居的一个或多个 $\gamma$ 射线源。该测量仪包括:测量仪外壳,具有适于放置在材料样品表面上的表面。微居 $\gamma$ 射线源安装在外壳内,用于发射 $\gamma$ 射线,所发射的 $\gamma$ 射线通过底板进入下面的材料样品。在测量仪外壳内,与 $\gamma$ 射线源隔开,至少设置一个能量可选 $\gamma$ 射线检测器,可用于产生表示所检测的 $\gamma$ 射线的能级的信号。密度计算装置与该检测器相连,可用于根据能级在检测器检测的 $\gamma$ 射线的预定能谱部分内的检测信号,计算材料的密度值。在一个实施例中,密度计算装置包括分析器,该分析器与检测器相连,可用于对从检测器输出到对应于所述预定能谱部分的一个或多个通道内的各信号进行分类和累计。例如,该分析器包括多通道分析器,该多通道分析器对检测器检测的 $\gamma$ 射线能谱范围内的多



个离散通道内的各信号进行分类和累计，并且其中至少这些离散通道之一确定所述预定能谱部分。

在一个具体实施例中，用于进行密度计算的预定能谱部分具有0.1MeV或者更高的下限和不超过 $\gamma$ 射线源的特性原始能量的上限。 $\gamma$ 射线源可以包括至少一个其原始能量为0.662 MeV的铯-137 $\gamma$ 射线源。检测器优选是闪烁检测器，并且该系统可以优选包括与闪烁检测器相连、可以识别其能量在规定能谱范围内的射线计数的分析器。

#### 附图说明

10 根据以下的详细说明并根据附图，已经描述的本发明的一些特征和优点以及其它特征和优点将变得更加明显，附图包括：

图1是根据本发明实施例的测量仪的分解示意图。

图2是示出对测量仪获得的信号进行处理的电路的原理图。

15 图3是根据本发明第二实施例的测量仪的侧视图，其中射线源轮位于屏蔽的、升高位置。

图4是示出图3所示的测量仪中使用的射线源轮的侧视图。

图5是射线源轮的剖视图。

图6是图3所示测量仪的侧视图，其中射线源轮位于暴露的、降低位置。

20

#### 具体实施方式

以下将参考附图更全面地说明本发明，附图示出本发明的优选实施例。然而，可以以许多不同方式实现本发明，并且不应将本发明局限于在此说明的实施例，相反，提供这些实施例是为了使此说明全面、完整，并向本技术领域内的熟练技术人员充分说明本发明范围。在所有附图中，25 类似的参考编号表示类似的部件。

## 原理

本发明基于物质散射和吸收 $\gamma$ 射线的属性。对于能量低于2 MeV的 $\gamma$ 射线，物质存在两种主要互相作用的机理。在0.1至0.2 MeV能量范围内，主要作用机理是非弹性散射（康普顿散射）。对于低于0.1 MeV的能量，主要作用机理是光电吸收。在0.1至0.2 MeV能量范围内， $\gamma$ 射线散射量（能量降低）是材料中的电子密度的函数，因此密度是基本测量属性。这导致每单位长度质量密度产生核衰减，这不受材料成分的影响。在能量低于0.1 MeV时， $\gamma$ 射线的光电吸收对材料的原子数量敏感，因此对材料的化学（元素）成分敏感。所以，在将足够能量的 $\gamma$ 射线源放置在材料附近时，并且在能量可选 $\gamma$ 射线检测器用于进行 $\gamma$ 射线检测时，仅对主要进行康普顿散射的 $\gamma$ 射线进行计数。通过进行适当校准，可以将 $\gamma$ 射线计数转换为绝对密度。

根据本发明的一个具体实施例，采用原始能量为0.662 MeV的 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源。然而，也可以采用不同原始能量的其它 $\gamma$ 射线源，例如， $^{60}\text{Co}$ 。利用检测器测量 $\gamma$ 射线与样品的互相作用，该检测器优选是被配置用于检测预定能谱范围内的 $\gamma$ 射线的能量可选检测器。可以以各种方式配置 $\gamma$ 射线检测器以便选择要求的能谱。例如，在这里所示和所描述的实施例中，采用能量可选闪烁检测器，具体地说，是在光电倍增管（PMT）上安装碘化钠（NaI）晶体。在使用 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源时，对能量在0.1至0.4 MeV预定范围内、与样品互相作用的 $\gamma$ 射线进行计数。在另一个具体实施例中，对能量在0.1至0.25 MeV范围内的 $\gamma$ 射线进行计数。此能谱内的 $\gamma$ 射线就是与下面的材料互相作用的 $\gamma$ 射线，并散射到检测器。因为存在康普顿散射，所以射线具有比 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源的0.662 MeV原始能量低的低能级。对于 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源之外的其它 $\gamma$ 射线源，以同样方式根据所选择的具体射线源的能量分布选择上限。

## 设备

图1示出根据本发明测量仪的一个实施例。通常利用参考编号10表示该测量仪。该测量仪包括：底板12，具有大致平坦的下表面；测量仪外

壳14, 与底板12共同屏蔽封闭测量仪的各种部件。手柄16从测量仪外壳14向上伸出以便于移动该测量仪。在测量仪外壳14的上侧设置诸如该图所示的小键盘18和显示器19的适当的输入输出装置。

在底板12的上表面上安装测量仪的其它部件。如图所示, 在底板12的一个纵向端附近设置射线源板20。射线源板20为细长条形状。在所示的实施例中, 在射线源板20的一侧, 在彼此隔开的位置安装一系列3个分立点射线源。显然, 可以采用3个以上的分立点射线源。在未示出的变换实施例中, 射线源可以是连续的, 并且沿射线源板的整个长度分布。作为一种选择, 还可以以诸如围绕检测器的圆形图案形式排列射线源。在  
5 所有情况下,  $\gamma$ 射线源的总放射性不超过100微居。在所示的具体实施例中,  $\gamma$ 射线源为铯-137, 而且每个单独铯-137点射线源的放射性不超过10微居。

优选安装射线源板20, 以便于将它从底板12上卸下。在所示的实施例中, 射线源板20在其两端附近具有两个垂直延伸的孔, 该孔适于容纳  
15 诸如螺栓24的螺纹紧固件, 并且该螺纹紧固件使与底板12上形成的适当攻丝孔25接合在一起。这种配置使射线源可以卸下, 以或者进行替换, 或者进行背景射线计数, 以下对此做更全面解释。在将射线源板20安装到底板12上时, 还要确保射线源板20始终如一地位于同一个可靠位置, 由于为了获得准确可再现结果, 必须始终如一地保持射线源板20与射线  
20 检测器之间的距离和几何关系。出于放射安全性考虑, 可以将射线源板20系在测量仪上以防止在从测量仪上卸下时被丢失。

靠近与射线源板20相对的一端, 将能量可选检测器系统安装到底板12上。在图1所示的具体实施例中, 能量可选 $\gamma$ 射线检测器系统包括碘化钠晶体26和安装在碘化钠晶体上的光电倍增管28。在 $\gamma$ 射线触击碘化钠晶  
25 体时, 释放光强根据 $\gamma$ 射线的能级发生变化的光子。光电倍增管28检测光子并将它们转换为电信号, 然后, 利用安装在光电倍增管上的放大器30放大该电信号。放大信号通过导电体32到达电路板34, 电路板34对该信号进行处理, 以下将做更全面说明。

还在底板12上安装射线屏蔽体36。屏蔽体36直接设置在射线源板20与射线检测器组件之间以禁止 $\gamma$ 射线源22放射的 $\gamma$ 射线直接从射线源到达检测器。因此，只有射线源22放射的、被检测器接收的 $\gamma$ 射线通过底板12进入下面的材料样品，并且在该射线通过底板12向上散射回碘化钠晶体26之前，该射线已经与材料样品互相作用。因此，该测量仪以“后向散射”方式工作。可以阻挡 $\gamma$ 射线的任何一种适当材料均可以用作屏蔽体36，典型材料有铅或其它致密金属。

图2用原理图示出电路板34的各功能部件。模数转换器38将放大器30输出的模拟放大信号转换为用于量化 $\gamma$ 射线（光子）计数能级的数字信号。将模数转换器38的输出直接送到分析器装置，在所示的实施例中，分析器装置是将不同能级的各 $\gamma$ 射线计数数量累计到多个通道内的多通道分析器（MCA）39，其中每个通道对应于部分能级谱。为了计算密度，仅考虑检测器检测的整个能谱上的预定能谱部分。因此，进行密度计算时，仅考虑由对应于此预定能谱部分的一个或多个通道输出的累计计数。例如，在一个具体实施例中，在采用 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源时，此能谱具有0.1 MeV的下限和0.4 MeV的上限。在更具体实施例中，下限为0.1 MeV，上限为0.25 MeV。为了获取标准射线计数，或者为了补偿背景射线，可以考虑代表其它能谱片的分析器的其它通道。将MCA 39的输出送到处理器40，该处理器40包括一组适于将MCA输出的累计射线（光子）计数转换为密度值的存储指令。将处理器40有效连接到小键盘输入装置18和输出显示器19。

优选地，配置一个或多个 $\gamma$ 射线源以从横向延伸区域或区层射出 $\gamma$ 射线，从而提供 $\gamma$ 射线沿其向下传播到下面的样品内的若干通路。所得到的后向散射射线也沿若干通路传播返回检测器系统。在所示的实施例中，有3个10微居的 $^{137}\text{Cs}$ 点射线源安装在射线源板20上， $\gamma$ 射线源沿通常垂直于直接从射线源板到检测器的线的线取向。因为检测器可以通过整个区域接收射线，所以有许多传播通路可以使 $\gamma$ 射线向下进入下面的样品并后向散射到检测器系统。显然，利用沿射线源板20的整个长度延伸的射线源也可以实现类似结果。为了更有效使用检测器面积，检测器系统可以

包括多个并肩排列的更小的碘化钠晶体和相关光电倍增管，来代替图1所示的单独晶体26和光电倍增管28。通过以这样的方式设置从射线源到检测器的多个传播通路，测量仪还可以检测更大体积的样品，从而降低因为样品表面粗糙产生的误差。

5

### 能谱稳定化

闪烁检测器对温度波动敏感。在MCA产生的数字能谱中，闪烁检测器检测的 $\gamma$ 射线的能级被相关处理为表示对应于具体 $\gamma$ 射线能级或范围的许多通道之一（例如：512）。利用图形，以x方向表示此能谱，以y方向表示每个通道内的射线计数总数量。在温度发生波动时，能谱在x方向非线性波动。因此，曾经以一个通道为中心的峰值可能以不同通道为中心终止。如果希望求出表示能量 $E_{\text{lower}}$ 的 $C_{\text{lower}}$ 与表示能量 $E_{\text{upper}}$ 的 $C_{\text{upper}}$ 之间的各通道内的 $\gamma$ 射线（光子）计数，则由于这些波动，利用“原始”能谱获得的射线计数将因为温度敏感性而具有不确定性。利用模拟或数字能谱稳定器来稳定因为NaI检测器内的温度波动产生的能谱偏移。为了稳定能谱，对测量仪设置辅助1微居 $^{241}\text{Am}$ 基准 $\gamma$ 射线源45，在图1所示的实施例内，靠近检测器26安装该基准 $\gamma$ 射线源45。用于稳定能谱的MCA利用射线源45输出的0.056 MeV峰值作为基准点。

在4分钟射线计数时间期间，MCA采集射线计数，然后对该射线计数进行信号振幅波动校准并将它存储在缓冲器内。在结束射线计数时，MCA给出稳定能谱。

在另一种方法中，不需要作为基准的附加射线源，就可以实现能谱稳定化。可以在屏蔽体36内设置细小“泄漏”孔，以便少量 $\gamma$ 射线直接从射线源22到达检测器26。在此例中，可以将 $\gamma$ 射线源本身的0.662 MeV的峰值用作用于能谱稳定的基准点。

### $\gamma$ 射线背景

为了精确测量密度，必须对样品及其周围产生的背景 $\gamma$ 射线进行量化。传统核子测量仪利用强 $\gamma$ 射线源（例如：约8000 微居）实现大信噪

比以致可以忽略不计背景射线的影响,来避免出现此问题。利用本发明,有几种可能方法对背景 $\gamma$ 射线进行补偿。例如,根据一种方法,可以用物理方法从测量仪上卸下射线源板20并放置到对检测器屏蔽的位置。然后,可以使无射线源测量仪工作以获得表示背景能谱的 $\gamma$ 射线计数。根据另一种方法,利用下述射线源构造测量仪:该射线源可以从进行测量密度工作的非屏蔽操作位置移动到进行背景校准工作的测量仪内的内部屏蔽位置。图3示出采用这种方法的一个示例实施例。为了避免重复,在此实施例内,利用具有附加撇号“'”的类似参考编号表示与上述描述的部件对应的部件。在此实施例中, $\gamma$ 射线源22'位于圆盘52上,所安装的圆盘52在屏蔽室54内旋转。圆盘52(如图4和图5所示)和屏蔽室54均由对 $\gamma$ 射线不透明的诸如铅的致密材料制成。与圆盘52相连的转轴56从测量仪外壳伸出用于旋转圆盘。在位于屏蔽位置用于进行背景射线计数和存储时,旋转圆盘以便射线源22'被屏蔽室完全屏蔽,如图3所示。在测量密度时,转轴56旋转180°以将射线源22'定位在图6所示的非屏蔽操作位置。在此位置,射线源22'接近底板12'的下表面,以便 $\gamma$ 射线直接进入位于测量仪底板之下的材料样品。

还可以在“正在运行”时,根据能级为1.460 MeV或接近1.460 MeV的 $\gamma$ 射线计数的测量值,估计 $\gamma$ 射线背景。元素钾具有长寿命放射性同位素,K-40,它放射1.460 MeV的 $\gamma$ 射线。由于在通常用作沥青铺路配料的石料中存在钾,所以1.460 MeV $\gamma$ 射线康普顿散射产生对于测量密度有影响的背景射线。另一种方法采用0.662 MeV  $\gamma$ 射线峰值的直线部分的数学拟合法。可以利用此直线的斜率估计背景射线。又一种方法利用单独较小检测器系统测量背景。此检测器可以通过电缆连接到测量仪的电子线路,并将该检测器设置在远离射线源的一侧的位置,或者设置在测量仪外壳的外部。

### 标准射线计数

核子测量仪采用有限半衰期放射性射线源。该射线源的放射性因为原子核的衰变而随时间降低。为了对变化的射线源放射性进行补偿,将

所测量的 $\gamma$ 射线计数标准化为对标准样的计数。此计数比与时间无关。在传统测量仪内，此标准样是聚乙烯块。本发明可以采用用于获取标准样校准射线计数的几种方法中的任何一种方法。例如，在一种方法中，可以将测量仪放置在厚度为2至3英寸、表面积是测量仪脚印尺寸的1倍或2

5 倍的标准样板之上。这些标准样板可以是镁、铝或镁与铝的组合，并在每个标准样板上获取后向散射射线计数。从射线源射向检测器的 $\gamma$ 射线被屏蔽体完全阻止，以便仅获取后向散射读数，并在例如0.1—0.25 MeV（对于0.662 MeV原始能量的 $^{137}\text{Cs}$ 射线源）的具体能量窗口内读取射线计数。

在另一种方法中，在屏蔽体内形成小钻孔以为 $\gamma$ 射线提供从射线源到

10 检测器的直接通路，这样检测器就可以检测到0.662 MeV能量的 $\gamma$ 射线的直接射束。在将测量仪放置在标准样板上并正在运行时，0.662 MeV  $^{137}\text{Cs}$ 峰值的净射线计数可以用作标准射线计数。在此，“正在运行”是指测量仪已放置在测试材料上的时候。在将测量仪放置在测试材料上时，与后向散射密度计数同时读取标准射线计数（在0.662 MeV原始能量中的净

15 射线计数）。

在又一种方法中，在测量仪外壳中，靠近主射线源插入小型盖革—弥勒管，它用于确定标准射线计数。此小型盖革—弥勒管位于测量仪内部，而且不受下面的材料密度的影响。

## 20 测量仪校准例子1

与其它核子测量仪相同，必须对该测量仪进行校准以将 $\gamma$ 射线计数转换为材料容积密度。利用3个固体金属校准板：具有109.8 pcf（磅/每立方英尺）土壤等效密度的镁板、具有133.3 pcf土壤等效密度的镁/铝复合板以及具有161.2 pcf土壤等效密度的铝板进行初步校准。该测量仪以

25 后向散射方式工作。利用0.1至0.25 MeV能量窗口内的射线计数估计密度。通过在从测量仪上卸下 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线源时获得的射线计数计算样品及其周围产生的背景射线。将测量仪放置在镁板上，然后读取3次4分钟射线计数。计算这些射线计数的平均值 $C_{\text{bgd1}}$ 。然后，将测量仪放置在镁/铝板上，读取3次4分钟射线计数。计算平均射线计数 $C_{\text{bgd2}}$ 。将射线源重新安装到位

于测量仪内的非屏蔽工作位置，并将该测量仪放置在镁板上，采集3次4分钟射线计数。计算平均射线计数 $C_{Mg}$ 。然后，将测量仪放置在镁/铝复合板上，读取3次4分钟射线计数。计算平均射线计数 $C_{MgAl}$ 。然后，将测量仪放置在铝板上，采集3次4分钟射线计数。计算平均射线计数 $C_{Al}$ 。

- 5 利用 $C_{bgd} = (C_{bgd1} + C_{bgd2}) / 2$ 来计算4分钟背景射线计数。镁板上的已针对背景进行了校正的计数用作标准射线计数 ( $C_{std}$ )，其中 $C_{std} = C_{Mg} - C_{bgd}$ 。

然后，利用下式计算每个样品的射线计数比 (CR)：  
 $CR_{plate} = (C_{plate} - C_{bgd}) / C_{std}$ ，其中 $C_{plate}$ 是在具体校准板上的射线计数。表1示出该数据。

10 表1

板	密度	4分钟射线计数	4分钟背景	射线计数比
Mg	109.8	574525	40458	1.000
Mg/Al	133.3	562293	41798	0.9771
Al	161.2	548285	—	0.0508

通过拟合到下式形式的标准等式，利用校准射线计数确定校准常数：

$$CR = Ae - BD - C$$

- 其中A、B和C是拟合系数或校准常数，而D是密度。最佳拟合给出3  
 15 个校准常数的下列数值：

$$A = 0.8245$$

$$B = 1.4036e-3 \text{ 以及}$$

$$C = -0.2932$$

## 20 测量仪校准例子2

利用层叠的1英寸厚镁板和1英寸厚铝板，可以制造便携式校准单元。该1英寸镁板本身由两层0.5英寸镁板构成。这些板的面积优选为测量仪脚印的1至2倍。



背景射线计数：将平板放置在地面上与1英寸镁板相对。将射线源卸下或者使射线源处于屏蔽位置，将测量仪放置到该板上。获取4分钟射线计数 ( $C_{bg}$ )。

标准射线计数：将平板放置在地面上与1英寸镁板相对。将射线源安装或者使射线源处于非屏蔽操作位置，将测量仪放置到该板上。获取4分钟射线计数 ( $C_{std, raw}$ )。标准射线计数  $C_{std} = C_{std, raw} - C_{bg}$ 。

用于校准的Mg射线计数： $C_{Mg} = C_{std}$ 。

用于校准的MgAl射线计数：现在卸下上部的0.5英寸镁板。在安装射线源，并且射线源处于工作情况下，将测量仪放置在板上，然后读取4分钟射线计数 ( $C_{MgAl, raw}$ )。MgAl射线计数  $C_{MgAl} = C_{MgAl, raw} - C_{bg}$ 。

用于校准的Al射线计数：现在旋转该板以与1英寸铝板相对。安装射线源并且使射线源工作，将测量仪放置在板上，然后读取4分钟射线计数 ( $C_{Al, raw}$ )。Al射线计数  $C_{Al} = C_{Al, raw} - C_{bg}$ 。

现在可以象校准例子1中描述的那样，利用以上获得的射线计数获得校准常数。

### 密度计算过程

优选利用适当编程的微处理器或诸如专用集成电路或通用计算机等任何其它功能等效装置计算材料样品的密度。将测量仪放置在待测量样品上，并获取诸如2至4分钟的适当时间周期的射线计数。从MCA获得具体感兴趣能谱部分的稳定射线计数。然后，利用按照上述校准例子的描述所获得的密度等式和校准常数，可以获得样品的密度值。在测量仪的显示器19上对用户显示此密度值。

在本方法的优选实施过程中，以进行计数的频繁间隔，例如每1至2秒重复计算一次累计 $\gamma$ 射线（光子）计数，并作为频率分组对每个累计 $\gamma$ 射线计数进行处理，利用数字滤波算法降低该分组的统计误差。由于不是等到2至4分钟射线计数结束显示密度值，所以该方法几乎可以在进行计数时对用户实时显示所计算的密度值。如图1所示，可以利用作为时间函数的图形方法显示密度值。由于数字滤波后的密度值稳定到稳定状态，

所以用户判定该计算密度值足够精确可以接受，并中止此测量过程，而无需等到全部2分钟或4分钟射线计数过程结束。这样，该计算方法可以减少测量密度所需时间，因此可以提高效率和生产率。

根据本发明的进一步修改的实施例，用户可以调节或设置测量仪的场深度，以便根据进入下面的材料内诸如至多1英寸或至多3英寸的特定深度来获得密度测量值。这是通过调节射线源与检测器之间的几何关系实现的。具体地说，在此修改的实施例中，射线源可调节地位于距离测量仪不同距离的几个位置之一。在图1所示的实施例中，这是通过将射线源板20固定到底板12的几个不同预定位置之一上实现的，几个不同预定位置是利用底板上的、接纳用于固定射线源板的螺栓24的其它组攻丝孔25'提供的。作为一种选择，可以相对于固定射线源位置，调整检测器的位置。

从上述描述的内容以及有关附图中受益的本发明所属技术领域内的熟练技术人员可以设想出本发明的许多变换例和其它实施例。因此，显然，本发明并不局限于所公开的具体实施例，而且变换例以及其它实施例均包括在所附权利要求所述的本发明范围内。尽管在此采用了具体术语，但是它们仅具有一般说明性意义，而没有限制性意义。

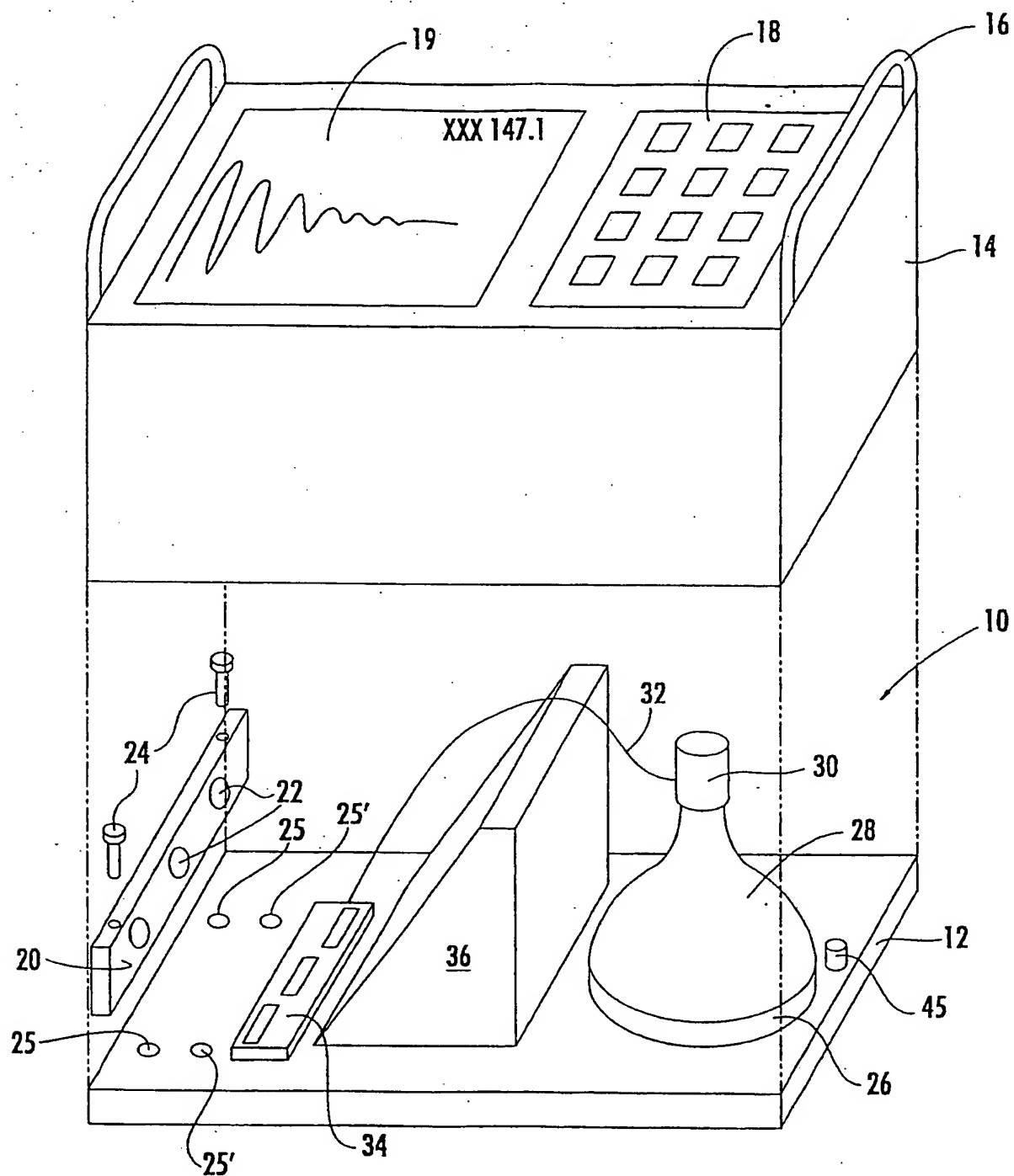


图 1

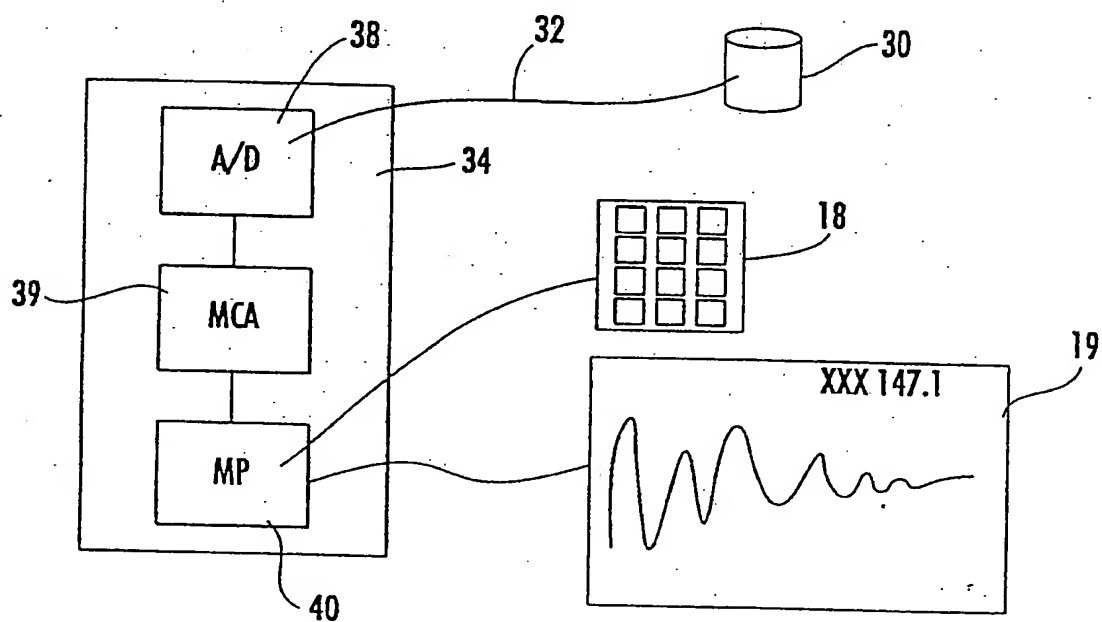


图 2

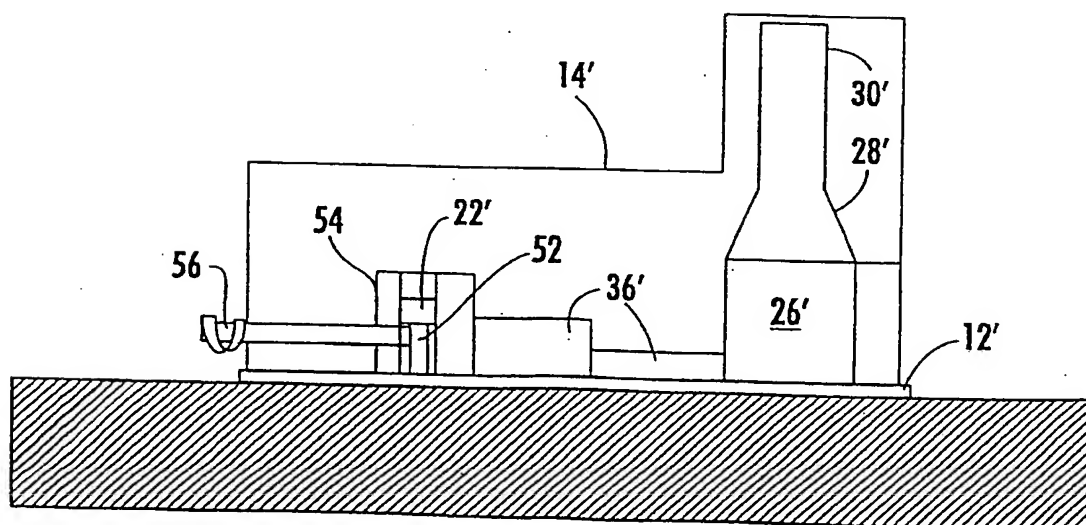


图 3

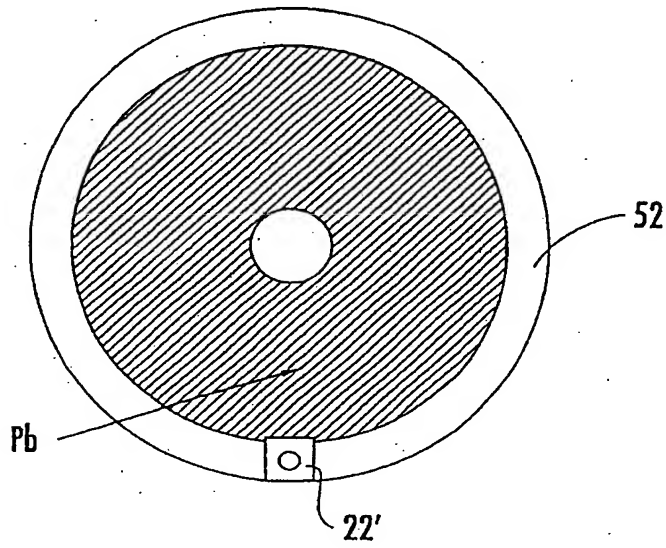


图 4

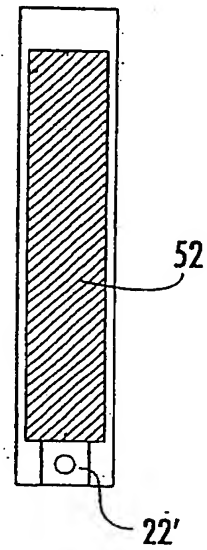


图 5

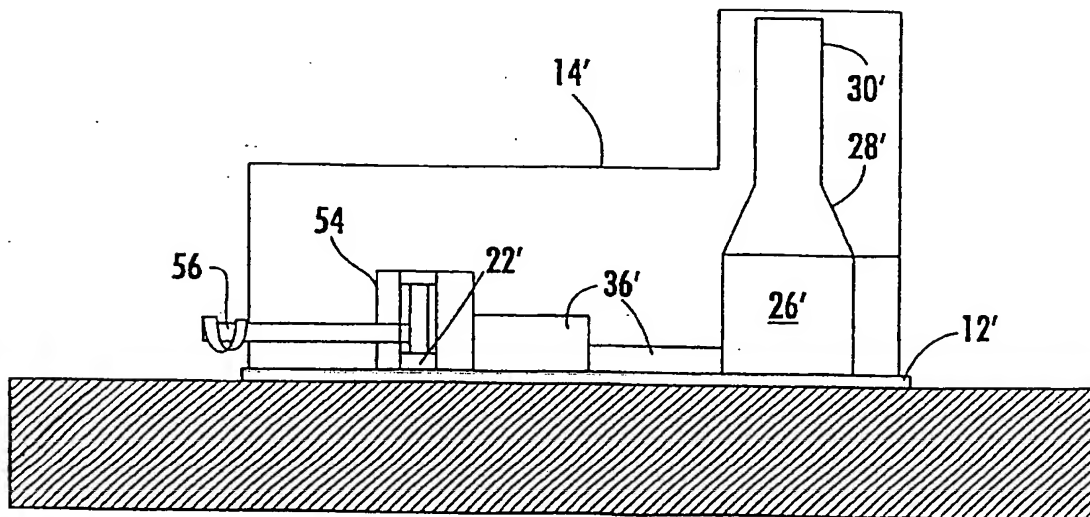


图 6